

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Dvounosníkový mostový jeřáb

Double-girder bridge crane

Student:

Miroslav Hubička

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Oldřich Učeň, Ph. D.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Miroslav Hubička**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení
Specializace: 21 Konstrukce výrobních strojů a zařízení
Téma: **Dvounosníkový mostový jeřáb**
Double-girder Bridge Crane

Zásady pro vypracování:

Navrhnete dvounosníkový mostový jeřáb s nosností 20 tun. Rozpětí mostu volte 18880 mm, rozchod kočky 1700 mm, rozvor kočky 1400 mm, rychlost zdvihu kočky 2,5/0,4 m.min⁻¹, rychlost pojezdu kočky 20/5 m.min⁻¹. Osovou vzdálenost nosníků volte 1700 mm.

Vypracujte:

1. Technickou zprávu s popisem funkce navrhovaného zařízení se všemi nezbytnými výpočty.
2. Konstrukční návrh dvounosníkového mostového jeřábu.
3. Pevnostní kontrolu důležitých uzlů.
4. Detailní výrobní výkres vybrané součásti.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910. *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
Leinveber, J., Řasa, J., Vávra, P. *Strojnické tabulky*. 3. vyd. Praha: Scientia, 1999, 985 s. ISBN 80-7183-164-6.
NĚMČEK, M.: *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů*. 2. vydání. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1782-8.
Literární rešerše zpracovaná v rámci Ročníkového projektu.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Oldřich Učeň, Ph.D.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o veřejných školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Adresa trvalého pobytu:

Miroslav Hubička
Mezice 41
783 32, Náklo

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HUBIČKA, M. *Dvounosníkový mostový jeřáb*. Ostrava: Katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2014, 58 s. Vedoucí práce: Ing. Oldřich Učeň, Ph.D.

V Bakalářské práci jsme se zabýval návrhem a výpočtem dvounosníkového mostového jeřábu celkové nosnosti 20t. Jeřáb má rozpětí 18,88m, výška zdvihu 7m, rozvor 4,5m. Práce obsahuje pevnostní výpočet nosníku posouzeného podle dvou mezních stavů uvedených v normách ČSN 27 0103 a ČSN 73 1401.

ANNOTATION BACHELOR THESIS

HUBIČKA, M. *Double-girder bridge crane*. Ostrava: Department of Production Machine and Design, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-Technical University of Ostrava, 2014, 58 pages. Thesis head: Ing. Oldřich Učeň, Ph.D.

In the thesis, We dealt with the design and computation overhead double-girder bridge crane total capacity 20 tons. The crane has a span of 18.88 m, lifting height 7m, 4.5m wheelbase. The work includes the calculation of the strength of the beam adjudged by two limit states specified in the standards ČSN 27 0103 and ČSN 73 1401.

Poděkování

Chci poděkovat panu Ing. Vítu Konstečkoví za poskytnutí cenných rad při vypracovávání bakalářské práce.

Seznam použitých symbolů

γ_g	[-]	součinitel od vlastní hmotnosti
γ_{lo}	[-]	součinitel od jmenovitého břemena
δ_h	[-]	součinitel zatížení od svislých setrvačných sil
v_h	[-]	rychlost zdvihu břemene
δ_t	[-]	dynamický součinitel pojezdový
μ	[-]	součinitel od setrvačných sil při brzdění
γ_i	[-]	součinitel zatížení
λ	[-]	součinitel příčeni jeřábu
λ_k	[-]	součinitel příčeni jeřábové kočky
γ_{tp}	[-]	součinitel zatížení od příčných sil
m_{vh}	[kg]	vlastní hmotnost konstrukce
m	[kg]	jmenovité břemeno
m_s	[kg]	hmotnost stálého břemena
F_{n1}	[KN]	síla připadající na jedno kolo nezatížené kočky
B_{n1}	[KN]	setrvačná síla od nezatížené kočky
F_n	[KN]	síla připadající na jedno kolo zatížené kočky bez součinitelů
F_v	[KN]	síla připadající na jedno kolo zatížené kočky včetně součinitelů
B_{v1}	[KN]	setrvačná síla zatížené kočky
Q_j	[KN]	zatížení od vlastní hmotnosti jeřábu
H_{tp}	[KN]	zatížení od příčeni mostu
E_k	[J]	kinetická energie
F_{st}	[KN]	zatížení zkušebním břemenem při statické zkoušce
F_{dyn}	[KN]	zatížení zkušebním břemenem při dynamické zkoušce
m_c	[kg]	hmotnost obou nosníků
m_{1n}	[kg]	hmotnost jednoho nosníku

R_a, R_b [kN]	reakce
$M_{og\max}$ [kN·m]	ohybový moment od vlastní tíhy
$M_{ob\max}$ [kN·m]	ohybový moment od břemene
B_t [kN]	třecí síla
M_t [kN·m]	moment od brzdící síly
L [m]	rozpětí mostu
x [m]	vzdálenost maximálního ohybového momentu
x_2 [m]	krajní poloha kladnice
b [m]	rozvor kočky
H_k [m]	výška kolejnice
H_n [m]	výška nosníku
a_d [m·s ⁻²]	zpomalení, zrychlení
M_d [kN·m]	moment od příčné síly
$T_1...T_5$ [-]	těžiště jednotlivých ploch
$t_1...t_5$ [mm]	tloušťky plechů
B_1 [mm]	šířka nosníku
B_2 [mm]	šířka kolejnice
H_1 [mm]	výška stojiny
C_1 [mm]	rozteč stojin
Y_t [mm]	vzdálenost k centrálnímu těžišti
$a_1...a_2$ [mm]	vzdálenost těžišť
I_x [mm ⁴]	kvadratický moment k ose x
I_y [mm ⁴]	kvadratický moment k ose y
y_D [mm]	dovolený průhyb
y_{skut} [mm]	průhyb navrženého nosníku
t_{tl} [s]	doba útlumu konstrukce
f [s ⁻¹]	vlastní frekvence nosníku
c_o [N·m ⁻¹]	tuhost nosníku

m_{red}	[kg]	redukována hmotnost
J	[mm ⁴]	kvadratický moment kolejnice a horní pásnice (roznášecí plocha)
σ_m	[MPa]	místní napětí
W_{ox}	[mm ³]	modul průřezu v ohybu k ose x
W_{oy}	[mm ³]	modul průřezu v ohybu k ose y
M_k	[KN·m]	krouticí moment
F_x	[KN]	vodorovná síla
W_k	[mm ³]	modul průřezu v krutu
S_{xstat}	[mm ³]	statický moment k ose x
σ	[MPa]	normálové napětí
τ	[MPa]	tečné napětí
σ_{cr}	[MPa]	kritické napětí
a	[mm]	rozteč příčných diafragmat
γ	[-]	součinitel
χ	[-]	součinitel tuhosti v kroucení
K_0, K_1	[-]	součinitel
τ_{cr}	[MPa]	kritické tečné napětí
α	[-]	poměr delší strany posuzovaného pole stěny ke kratší straně
s	[-]	poměr, kratší strana posuzovaného pole k delší
$\sigma_{m,cr}$	[MPa]	kritické místní napětí
a_6	[mm]	vzdálenost prvního kola kočky od reakce
L	[m]	rozpětí mostu
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
R_e	[MPa]	mez kluzu
l_1	[mm]	vzdálenost od celkového těžiště k počítanému místu
$R_{fat(-1)}$	[MPa]	základní výpočtová pevnost při únavě
$R_{fat,p(0)}$	[MPa]	výpočtová pevnost materiálu v tlaku
$R_{fat,p(\chi)}$	[MPa]	výpočtová pevnost při únavě v tlaku
$R_{fat,t(0)}$	[MPa]	výpočtová pevnost materiálu v tahu

$R_{fat,t(\chi)}$ [MPa]	výpočtová pevnost při únavě v tahu
χ_u [-]	poměr mezních napětí
$\tau_{//}$ [MPa]	rovnoběžné tečné napětí s osou svaru
τ_{\perp} [MPa]	kolmé tečné napětí na osu svaru

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	17
1. Úvod.....	22
2. Rozdělení jeřábů.....	23
3. Mostový jeřáb.....	28
3.1 Parametry jeřábu	29
3.2 Začlenění jeřábu	29
4. Zatížení a jejich součinitelé.....	31
5. Výpočet sil.....	37
6. Návrh nosníku	41
7. Posouzení na II. mezní stav	44
8. Útlum konstrukce	45
9. Posouzení na I. mezní stav	46
10. Kontrola v místě nejmenšího průřezu	51
11. Boulení stěn.....	55
12. Únosnost při únavě.....	57
12.1 Horní pásnice.....	57
12.2 Spodní pásnice.....	59
12.3 Stojina pod horní pásnicí.....	61
13. Kontrola svaru v místě maximálního ohybového momentu	63
13.1 Horní pásnice.....	63
13.2 Spodní pásnice.....	64
14. Kontrola svaru v zúženém průřezu.....	66
14.1 Horní pásnice.....	66
14.2 Dolní pásnice.....	66
15. Závěr.....	68
16. Použitá literatura	69
17. Seznam obrázků	70
18. Seznam příloh.....	71

1. Úvod

Jeřáby jsou nejrozšířenější zařízení pro zvedání a přemisťování břemen svislým a vodorovným pohybem ve vymezeném pracovním prostoru. Toto zařízení spadá do skupiny dopravních strojů. Při navrhování těchto zařízení musí být splněny podmínky provozu a bezpečnosti podle ČSN 27 0103.

Jmenovitá nosnost jeřábu je dána přípustnou hmotností břemena, kterými se smí jeřáb zatížit. Jeřáb musí být viditelně označen údajem o maximální nosnosti. U jeřábu s pomocným zdvihem musí být nosnost označena pro každý zdvih samostatně. Celková nosnost u jeřábu s více zdvihy je určena pouze hlavním zdvihem, ne součtem hlavního a pomocného zdvihu. Jen u jeřábu se dvěma zdvihy, které pracují současně, lze celkovou nosnost určit součtem nosností obou zdvihů.

2. Rozdělení jeřábů

při označování se přihlíží na jejich celkový tvar, nebo charakteristické části, druhu pohonu, pohybu, práce.[3]

a) Podle tvaru jeřábu

- Mostové
- Portálové a poloportálové
- Sloupové, věžové
- Konzolové
- Silniční a kolejové
- Plovoucí
- Lanové

b) Podle druhu pohonu

- S elektrickým motorem
- Se spalovacím motorem
- S hydraulickým pohonem
- S pneumatickým pohonem
- S ručním pohonem
- S parním pohonem- u starých železničních jeřábů

c) Podle druhu pohybu

- Nepojízdné – nemění pracoviště, břemeno je přemístěno pomocí pojízdné jeřábové kočky a otáčením výložníku
- Pojízdné
- Otočné
- Plovoucí
- Se sdruženými pohyby

d) Podle využití

- Montážní
- Dílenské
- Hutní – lící, kovací, kalící
- Nádvorní
- Skladové
- Stavební
- Železniční
- Přístavní



Obrázek 1 Portálový jeřáb [7]



Obrázek 2 Silniční jeřáb [8]



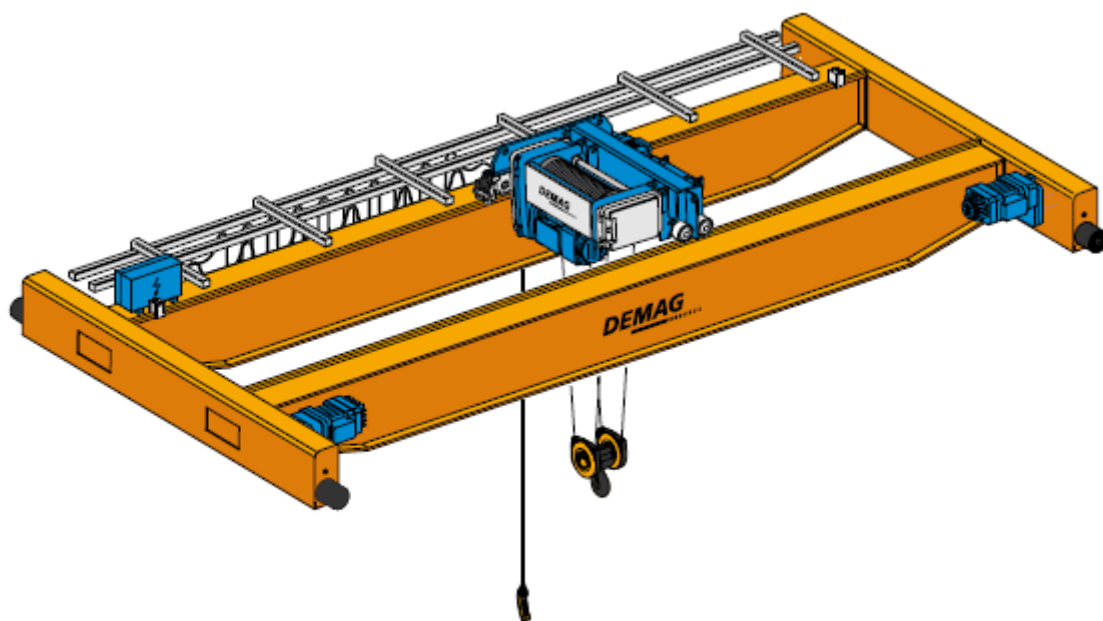
Obrázek 3 Sloupový otočný jeřáb [7]



Obrázek 4 Pojízdný konzolový jeřáb [7]



Obrázek 5 Plovoucí jeřáb [9]



Obrázek 6 Dvounosníkový mostový jeřáb [5]

3. Mostový jeřáb

Nosnou konstrukci tvoří jeřábový most. Pomocí šroubů je most připevněn k mostovým pojezdům (příčnicům) a tvoří jeden tuhý celek – rám, který se pohybuje po jeřábové dráze. U dvounosníkového mostového jeřábu se jeřábová kočka pohybuje po kolejnicích, které jsou připevněny k horním pásnicím. Kolejnice může být připevněna pomocí šroubů nebo přivařena. Pracovní pole je obdélníkového tvaru. U jednonosníkového jeřábu je kočka zavěšena na spodní pásnici a pohybuje se po ní. Nosná konstrukce může být příhradová, skříňová, plnostěnná nebo válcované profily. V současné době se nejvíce používají uzavřené svařované obdélníkové konstrukce. Výhody příhradové konstrukce jsou v nižší hmotnosti, což vede k úspoře materiálu a tím je zároveň nosník méně zatížen od vlastní hmotnosti. Nevýhoda tohoto typu nosníku je v značné pracnosti a nákladnosti na výrobu a menší tuhost v kroucení. Výroba svařovaných uzavřených nosníků je méně pracná a nákladná z důvodu použití svařovacích automatů. Konstrukce lépe zachycuje horizontální síly, je odolný proti kroucení. Nevýhodou je větší hmotnost a tím i zatížení od vlastní tíhy konstrukce.

Hlavní části mostového jeřábu:

- Jeřábový most
- Jeřábová kočka
- Pojízďecí ústrojí mostu včetně kol (příčnící)
- Koš pro jeřábníka (u jeřábu s velkou nosností)
- Elektrická výzbroj

Podle účelu rozeznáváme jeřáby:

- Normální s hákem (běžné)
- Drapákové
- Zvláštní konstrukce
- Hutní

3.1 Parametry jeřábu

- Maximální nosnost 20[t]
- Rozpětí mostu 18,88[m]
- Rozvor mostu 4,5[m]
- Rozchod kočky 1,7[m]
- Rozvor kočky 1,4[m]
- Rychlost zdvihu břemene max/min 4/0,67[$m \cdot \min^{-1}$]
- Rychlost pojezdu kočky max/min 20/5[$m \cdot \min^{-1}$]
- Rychlost pojezdu mostu 40[$m \cdot \min^{-1}$]
- Kolejnice jeřábové kočky – plochá tyč 50x30

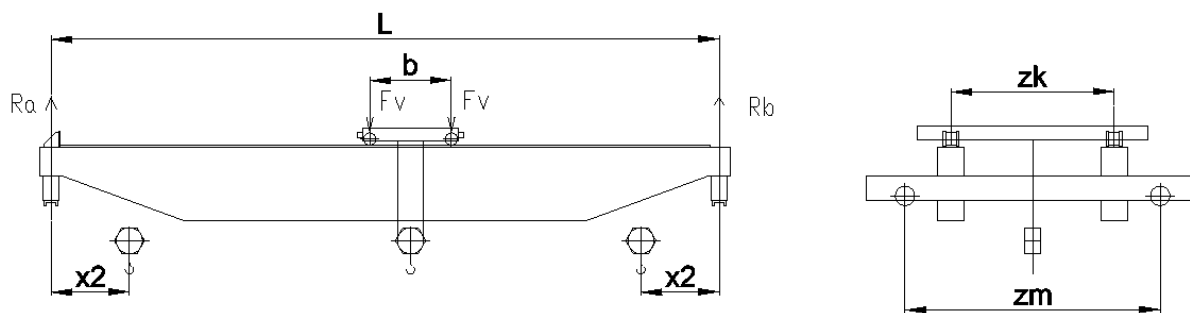
3.2 Začlenění jeřábu

Dle normy ČSN 27 0103 se jedná o dvounosníkový mostový jeřáb pro všeobecné použití.

Charakteristika provozu:

- Zdvihová třída: H2
- Druh provozu: D2
- Spektrum napětí: S1
- Provozní skupina: J3
- Dle spektra napětí a provozní skupiny je počet cyklu $N = 2 \cdot 10^5 \div 6 \cdot 10^5$

Schéma konstrukčního návrhu



Obrázek 7 Konstrukční uspořádání

Navrhovaný mostový jeřáb o nosnosti 20[t] je určen k provozu ve výrobní hale. Nosná konstrukce je navržena bez plošiny a bez pochůzí lávky a kabiny pro jeřábníka z důvodů úspory materiálu a snížení hmotnosti konstrukce. Jeřáb bude kontrolovaný a udržovaný z pojízdné nůžkové plošiny. Při výpočtu neuvažuji zatížení větrem a zatížení sněhem, námrazou a ledem, dále neuvažuji zatížení od kabiny, lávky, plošin, schodů a žebříků. Celková rám jeřábu se skládá ze dvou nosníku (mostů) a dvou příčníků. Na horní pásnici je přivařena kolejnice, po které se pohybuje jeřábová kočka. Profil nosníku je svařen z jednotlivých plechů do tvaru obdélníku a je po celé své délce vyztužen hlavními diafragmaty. Diafragmata jsou odlehčena a přivařena k horní pásnici a ke stojinám. V této práci jsem se nezbýval pevnostním návrhem příčnicku a jeřábové kočky. Pohony a zvedací mechanismus je vytypován dle nosnosti a nakoupen již jako vyrobené celky. Nosníky jsou připevněny k příčníkům pomocí šroubů. Příčník a jeřábová kočka má dvě hnací kola a dvě hnaná kola. Hnací kola na příčnicku od jeřábu a od jeřábové kočky jsou umístěna na každém příčnicku proti sobě. Dále je příčník i kočka jsou opatřeny nárazníky.

4. Zatížení a jejich součinitelé

Hmotnost jednotlivých částí jeřábu

- Hmotnost nosníku (odhad)	4 500[kg] (2x)
- Hmotnost kočky	1 570[kg]
- Hmotnost kolejnice	220[kg] (2x)
- Hmotnost kladnice s hákem	350[kg]
- Hmotnost příčníků	490[kg] (2x)
- Hmotnost elektrické výzbroje (odhad)	200[kg]

Určení součinitelů

Součinitelé vypočítáme, nebo určíme dle normy ČSN 27 0103

- a) Součinitel zatížení od vlastní hmotnosti, určen ze strany 8.

$$\gamma_g = 1,1[-]$$

- b) Součinitel zatížení od jmenovitého břemena, určen ze strany 9, Tab. 1

$$\gamma_{lo} = 1,3[-]$$

- c) Součinitel zatížení od svislých setrvačných sil vznikajících při zvedání nebo spouštění břemena. Dynamický součinitel zdvihový, určen ze strany 9, 10, Tab. 2

$$\delta_h = 1 + H_i \cdot (0,1 + 0,13 \cdot v_h)$$

$$H_i = 2$$

$$v_h = 4,00[m \cdot \min^{-1}] \Rightarrow \frac{1}{15}[m \cdot s^{-1}]$$

$$\delta_h = 1 + 2 \cdot (0,1 + 0,13 \cdot \frac{1}{15})$$

$$\delta_h = 1,217[-]$$

- d) Součinitel zatížení od svislých setrvačných sil vznikajících při pojíždění. dynamický součinitel pojezdový, určen ze strany 11, Tab. 4

$$\delta_t = 1,1[-]$$

- e) Součinitel zatížení od setrvačných sil vznikajících při rozjíždění a brzdění, určen ze strany 11

$$\mu = 0,14[-]$$

f) součinitel zatížení, určen ze strany 11.

$$\gamma_i = 1,1[-]$$

g) součinitel vodorovných sil od přičení jeřábu na jeřábové dráze, určen ze strany 12.

$$\lambda = 0,025 \cdot \frac{L}{z_m} = 0,025 \cdot \frac{18,88}{4,5} = 0,105[-]$$

h) součinitel přičení jeřábové kočky

$$\lambda_k = 0,025 \cdot \frac{L}{b} = 0,025 \cdot \frac{1,7}{1,4} = 0,03 \Rightarrow \text{dle ČSN 27 0103} \Rightarrow \lambda_{MIN} = 0,05[-]$$

i) součinitel zatížení od příčných sil, určen ze strany 13

$$\gamma_{tp} = 1,1[-]$$

Zatížení

Dle normy ČSN 27 0103 se při výpočtu ocelových jeřábů podle doby trvání a podle změn velikosti, polohy nebo smyslu a směru působení, rozeznávají zatížení a účinky zatížení.[1]

- Stálé
- Nahodilé
- Mimořádné

Stálé

Zatížení vyvolané od vlastní hmotnosti konstrukce, kolejí pro jeřábovou kočku, příčníků a elektrické výzbroje

$$m_{vh} = [(m_{nosniku} + m_{kolejnice} + m_p) \cdot 2 + m_{el.výzbroje}] = [(4500 + 220 + 490) \cdot 2 + 200] = 10620[kg]$$

Nahodilé

Je vyvolané od zatížení jmenovitým břemenem a od zatížení stálým břemenem (kladnice s hákem) a od zatížení částí měnicí svou polohu (kočka). Včetně zatížení od setrvačných sil při rozjezdu a brzdění jeřábu a jeřábové kočky a od přičení mostu.

Zatížení od jmenovitého břemena

$$m = 20000[kg]$$

Zatížení od stálého břemena

$$m_s = m_{kladnice} = 350[kg]$$

Kolový tlak nezatížené kočky

Kolový tlak nezatížené kočky udává výrobce, v mém případě výrobce žádné údaje neposkytl, předpokládám rovnoměrné rozložení hmotnosti na všechna čtyři kola. Hmotnost kočky je 1570[Kg].

$$F_{n1} = \frac{1570 \cdot 9,81}{4} = 3850,43N \approx 3,85[kN]$$

Setrvačné síly při rozjíždění a brzdění kočky

$$B_{n1} = 0,1 \cdot F_{n1} = 0,1 \cdot 3,85 = 0,39[kN]$$

Kolový tlak připadající na jedno kolo zatížené kočky břemenem

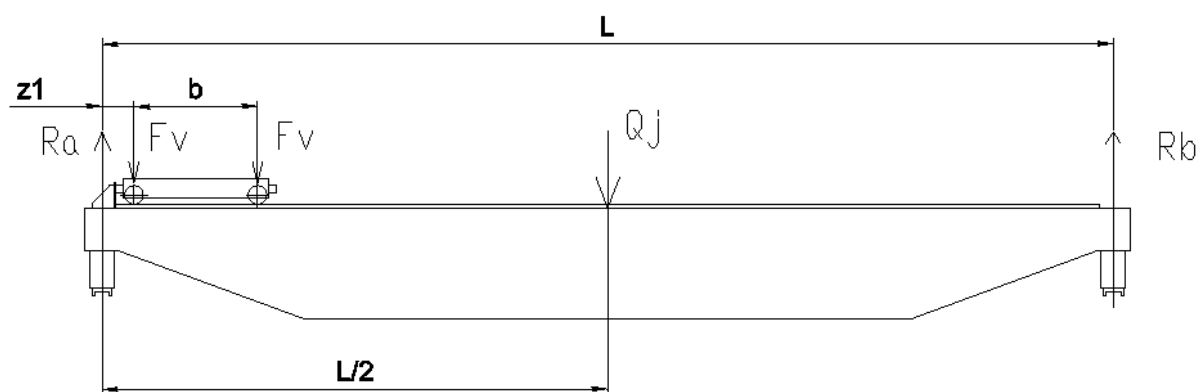
$$F_n = \frac{(m_k + m_b + m_s) \cdot g}{4} = \frac{(1570 + 20000 + 350) \cdot 9,81}{4} = 53,8[kN]$$

$$F_{v1} \frac{(m_k \cdot \delta_t \cdot \gamma_g + m_b \cdot \gamma_{lo} \cdot \delta_h) \cdot g}{4} = \frac{(1570 \cdot 1,1 \cdot 1,1 + 20000 \cdot 1,3 \cdot 1,217) \cdot 9,81}{4} = 82,3 [KN]$$

Setrvačná síla při rozjíždění nebo brzdění zatížené kočky

$$B_{v1} = F_{v1} \cdot \mu = 82,3 \cdot 0,14 = 11,5 [KN]$$

Zatížení od příčeni mostu



Obrázek 8 Schéma zatížení

Zatížení vzniklé od vlastní hmotnosti jeřábu a kočky s celkovým břemenem v krajní poloze.

- Rozpětí mostu $L=18,88$ [m]
- Rozvor kočky $b=1,4$ [m]
- Krajní poloha kočky $z_1=0,148$ [m]
- Zatížení od vlastní hmotnosti Q_j [KN]
- Rozvor mostu $z_m=4,5$ [m]

$$Q_j = [2 \cdot (m_n + m_p + m_{kolejnice}) + m_{el.v}] \cdot g = [2 \cdot (4500 + 490 + 220) + 200] \cdot 9,81 = 104,2 [KN]$$

$$\Sigma M_B = 0$$

$$-R_A \cdot L + F_v \cdot (L - z_1) + F_v \cdot (L - z_1 - b) + Q_j \cdot \frac{L}{2} = 0$$

$$-R_A \cdot 18,88 + 82,3 \cdot 18,732 + 82,3 \cdot 17,332 + 104,2 \cdot 9,44 = 0$$

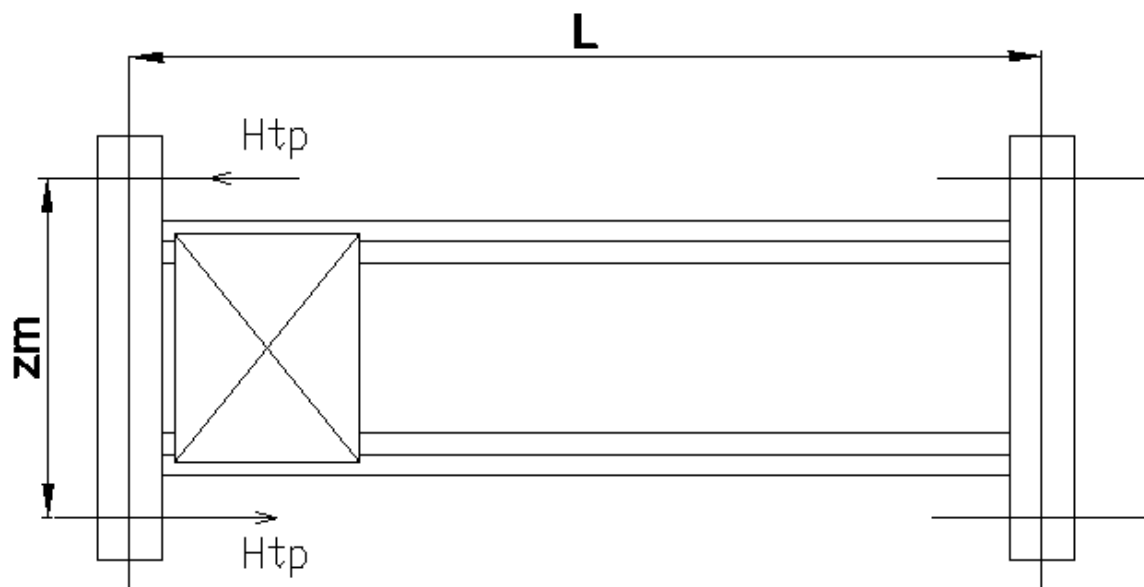
$$R_A = \frac{82,3 \cdot 18,732 + 82,3 \cdot 17,332 + 104,2 \cdot 9,44}{18,88} = 209,31 [KN]$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$-F_v \cdot z_1 - F_v \cdot (z_1 + b) - Q_j \cdot \frac{L}{2} + R_B \cdot L = 0$$

$$-82,3 \cdot 0,148 - 82,3 \cdot (0,148 + 1,4) - 104,2 \cdot 9,44 + R_B \cdot 18,88 = 0$$

$$R_B = \frac{82,3 \cdot 0,148 + 82,3 \cdot 1,548 + 104,2 \cdot 9,44}{18,88} = 59,49 [KN]$$



Obrázek 9 Zatížení jeřábového mostu silami od přičení

$$H_{tp} = \lambda \cdot 2 \cdot \Sigma K = 0,105 \cdot 2 \cdot 209,31 = 43,96 [KN]$$

Mimořádné

Zatížení od nárazu jeřábu na nárážky

Kinetická energie se počítá z 50% jmenovité rychlosti se zavěšeným stálým břemenem a 80% jmenovitého.

- Rychlost jeřábu $v = 40m \cdot \min^{-1} = \frac{2}{3} m \cdot s^{-1}$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot mv^2 = \frac{1}{2} \cdot [(m_s + m_b \cdot 0,8) \cdot (0,5 \cdot v^2)]$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \left[(350 + 20000 \cdot 0,8) \cdot \left(0,5 \cdot \left(\frac{2}{3} \right)^2 \right) \right]$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \left[(20350) \cdot \left(\frac{2}{9} \right) \right]$$

$$E_k = 1816,66[J]$$

Zatížení zkušebním břemenem při statické zkoušce

Při statické zkoušce je jeřáb zatížen zkušebním břemenem o hmotností 25% vyšší než je hmotnost jmenovitého břemena.

- Hmotnost břemene $m_b = 20000[kg]$

$$F_{st} = 1,25 \cdot m_b \cdot g$$

$$F_{st} = 1,25 \cdot 20000 \cdot 9,81$$

$$F_{st} = 245,25[KN]$$

Zatížení zkušebním břemenem při dynamické zkoušce

$$F_{dyn} = \frac{1 + \delta_h}{2} \cdot m_b \cdot g$$

$$F_{dyn} = \frac{1 + 1,217}{2} \cdot 20000 \cdot 9,81$$

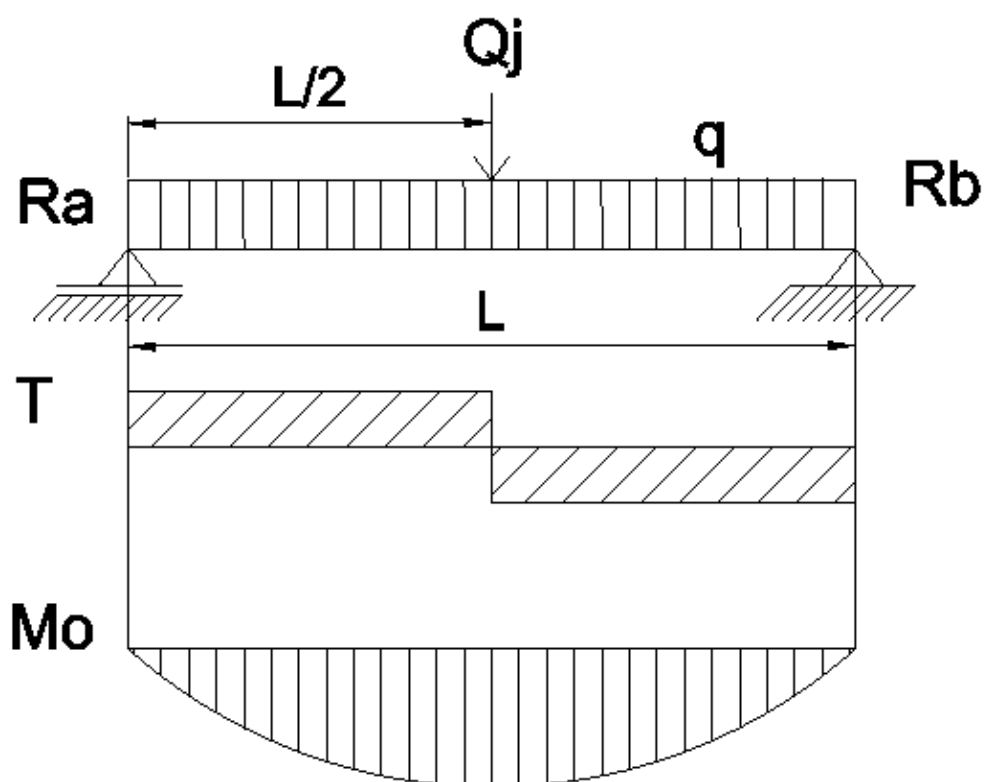
$$F_{dyn} = 217,5[KN]$$

5. Výpočet sil

Svislé síly působící na nosník

Zatížení od vlastní tíhy

Zatížení je spočítáno na jeden nosník. Toto zatížení se skládá z hmotnosti nosníku, kolejnice a z hmotnosti elektrického vybavení. Vynásobeny součinitelem od vlastní hmotnosti.



Obrázek 10 Průběh posouvajících sil a ohybového momentu od vlastní tíhy

hmotnost nosníku	m_n	[kg]
hmotnost nosníků, kolejnic, el. vybavení	m_c	[kg]
hmotnost připadající na jeden nosník	m_{ln}	[kg]
hmotnost elektrické vybavení	$m_{el.v.}$	[kg]
hmotnost kolejnice	m_{kol}	[kg]

$$m_c = 2 \cdot (m_n + m_{kol}) + m_{el.v} = 2 \cdot (4500 + 220) + 200 = 9640 [kg]$$

$$m_{1n} = \frac{m_c}{2} = \frac{9640}{2} = 4820 [kg]$$

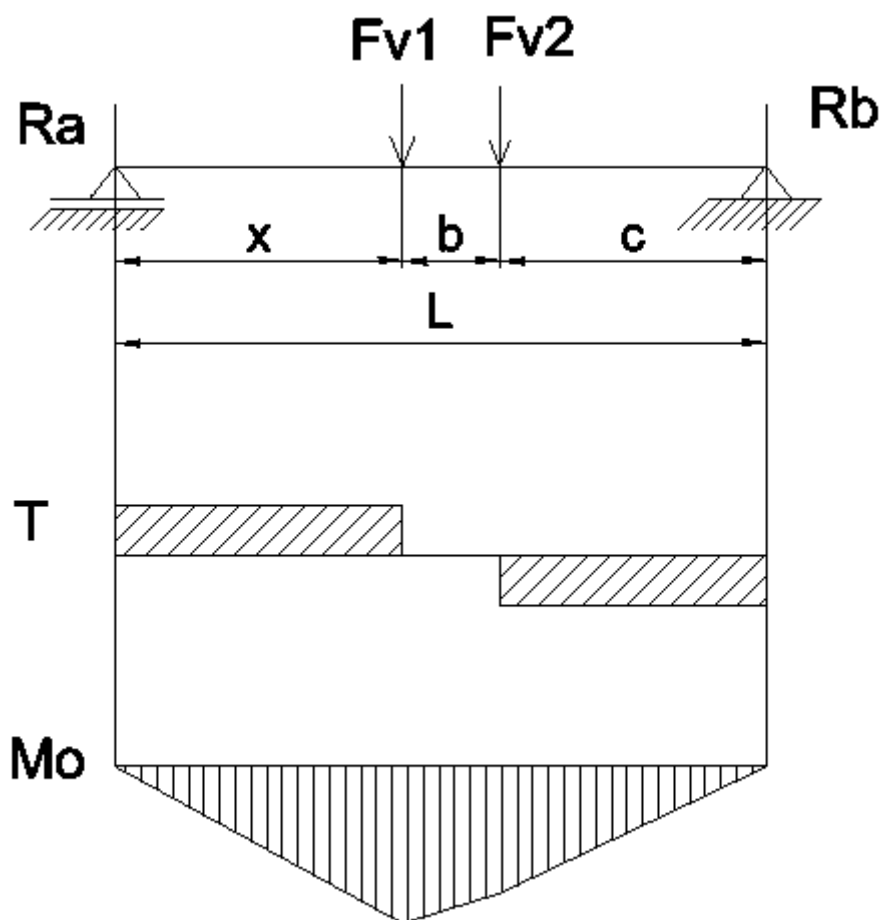
$$Q_j = m_{1n} \cdot g \cdot \gamma_i = 4820 \cdot 9,81 \cdot 1,1 = 52 KN \Rightarrow q \frac{Q_j}{L} = \frac{52}{18,88} = 2,5 \left[\frac{KN}{m} \right]$$

$$R_{aq} = R_{bq} = \frac{Q_j}{2} = \frac{52}{2} = 26 [KN]$$

$$M_{oq \max} = R_a \cdot \frac{L}{2} = 26 \cdot \frac{18,88}{2} = 245,44 [KN \cdot m]$$

Zatížení od jmenovitého břemena a kočky

Ze si F_{v1} a F_{v2} byly vypočítány reakce R_a a R_b . Dále byla vypočítána vzdálenost maximálního ohybového momentu x [m], a určen maximální ohybový moment M_{obmax} [KN·m].



Obrázek 11 Průběh posouvajících sil a ohybového momentu od jmenovitého břemene a kočky

$$x = \frac{L}{2} - \frac{F_{v2}}{F_{v1} + F_{v2}} \cdot \frac{b}{2} = \frac{18,88}{2} - \frac{82,3}{82,3 + 82,3} \cdot \frac{1,4}{2} = \frac{18,88}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{7}{10} = 9,09m$$

$$c = 18,88 - (x + b) = 8,39[m]$$

$$\Sigma Ma = 0$$

$$-F_{v1} \cdot x - F_{v2} \cdot (x + b) - R_b \cdot L = 0$$

$$R_b = \frac{F_{v1} \cdot x + F_{v2} \cdot (x + b)}{L} = \frac{F_{v1,2} \cdot (2x + b)}{L} = \frac{82,3 \cdot (2 \cdot 9,09 + 1,4)}{18,88} = 85,35[KN]$$

$$\Sigma Mb = 0$$

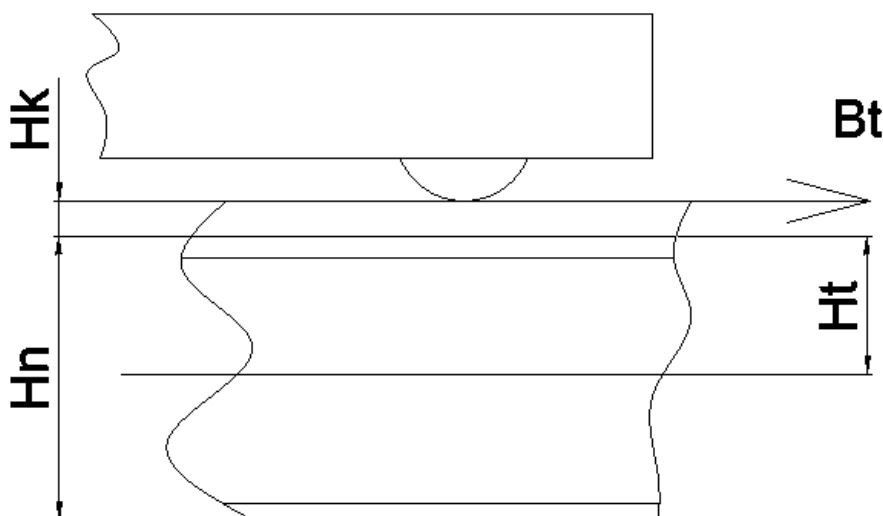
$$F_{v2} \cdot c + F_{v1} \cdot (c + b) - R_a \cdot L = 0$$

$$R_a = \frac{F_{v2} \cdot c + F_{v1} \cdot (c + b)}{L} = \frac{F_{v1,2} \cdot (2 \cdot c + b)}{L} = \frac{82,3 \cdot (2 \cdot 8,39 + 1,4)}{18,88} = 79,25[KN]$$

$$M_{ob_{max}} = R_a \cdot x = 79,25 \cdot 9,09 = 720,4[KN \cdot m]$$

Vodorovné síly působící na nosník

Podélná síla B_t byla vypočítána ze síly F_{v1} . Kterou jsme vynásobily součinitelem tření μ a součinitelem zatížení γ_i . Moment od brzdící síly M_t [KN·m] je vypočítán ze síly B_t [KN] a součtu vzdáleností H_t [m], což je vzdálenost od horní pásnice k centrálnímu těžišti a vzdálenosti H_k [m], která je výškou kolejnice.



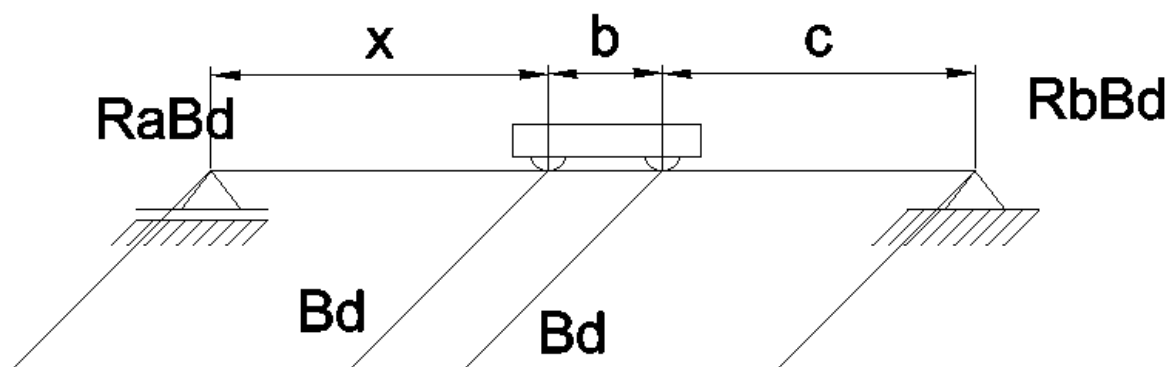
Obrázek 12 Schéma podélné brzdné síly

$$B_t = F_{v1} \cdot \mu \cdot \gamma_i = 82,3 \cdot 0,14 \cdot 1,1 = 12,7 [\text{KN}]$$

$$M_{t \max} = B_t \cdot (H_t + H_k) = 12,7 \cdot (0,53 + 0,03) = 8,8 [\text{KN} \cdot \text{m}]$$

Zatížení od příčné síly

Příčnou sílu B_d jsme vypočítali ze síly F_{v1} , kterou jsem vynásobili zrychlením jeřábu $a_d [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$ a součinitelem zatížení γ_i . Kočka je v místě maximálního ohybového momentu $M_{\text{obmax}} [\text{KN} \cdot \text{m}]$.



Obrázek 13 Schéma zatížení od příčné síly

$$a_d = \frac{(R_a + R_b) \cdot \mu}{m_s + m_b + m_{\text{kočoč}} + m_g} = \frac{(79,25 \cdot 10^3 + 85,35 \cdot 10^3) \cdot 0,14}{350 + 20000 + 1570 + 10620} = 0,708 [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$$

$$B_d = \frac{F_{v1}}{g} a_d \cdot \gamma_i = \frac{82,3}{9,81} \cdot 0,708 \cdot 1,1 = 6,5 [\text{KN}]$$

$$R_{aBd} = B_d \cdot \frac{L - x}{L} + B_d \cdot \frac{L - x - b}{L} = 6,5 \cdot \frac{18,88 - 9,09}{18,88} + 6,5 \cdot \frac{18,88 - 9,09 - 1,4}{18,88} = 6,26 [\text{KN}]$$

$$M_{d \max} = R_{aBd} \cdot x = 6,26 \cdot 9,09 = 56,9 [\text{KN} \cdot \text{m}]$$

- Tloušťka horní pásnice $t_2 = 14 \text{ [mm]}$
 - Tloušťka stojiny $t_3 = 8 \text{ [mm]}$
 - Výška stojiny $H_1 = 1000 \text{ [mm]}$
 - Rozteč stojin $C_1 = 380 \text{ [mm]}$
 - Vzdálenost do osy stojiny $d_1 = 186 \text{ [mm]}$
 - Tloušťka kolejnice $t_4 = 30 \text{ [mm]}$
 - Šířka kolejnice $B_2 = 50 \text{ [mm]}$
 - Vzdálenost vlastní těžišť k centrálnímu těžišti $a \dots a_4 \text{ [mm]}$
- $a = 518,65 \text{ [mm]}$
 $a_2 = 496,35 \text{ [mm]}$
 $a_3 = 10,65 \text{ [mm]}$
 $a_4 = 518,35 \text{ [mm]}$

Výpočet celkového těžiště T_c

N	S	x	y	S · x	S · y
1	7200	0	8	0	57600
2	6300	0	1023	0	6444900
3	8000	-	516	-	4128000
4	8000	+	516	+	4128000
5	1500	0	1045	0	1567500
Σ	31000	0	-	0	16326000

$$Y_T = \frac{S \cdot y}{\Sigma S} = \frac{16326000}{31000} = 526,65 \text{ [mm]}$$

$$X_T = 0 \text{ [mm]}$$

Výpočet kvadratického momentu k ose X

$$\begin{aligned} I_X = & \left[\left(\frac{t_1^3 \cdot B_1}{12} \right) + (a^2 \cdot t_1 \cdot B_1) \right] + \left[\left(\frac{t_2^3 \cdot B_1}{12} \right) + (a_2^2 \cdot t_2 \cdot B_1) \right] + 2 \cdot \left[\left(\frac{H_1^3 \cdot t_3}{12} \right) + (a_3^2 \cdot H_1 \cdot t_3) \right] + \\ & + \left[\left(\frac{t_4^3 \cdot B_2}{12} \right) + (a_4^2 \cdot t_4 \cdot B_2) \right] = \left[\left(\frac{16^3 \cdot 450}{12} \right) + (518,65^2 \cdot 16 \cdot 450) \right] + \left[\left(\frac{14^3 \cdot 450}{12} \right) + (496,35^2 \cdot 14 \cdot 450) \right] + \\ & + 2 \cdot \left[\left(\frac{1000^3 \cdot 8}{12} \right) + (10,65^2 \cdot 1000 \cdot 8) \right] + \left[\left(\frac{30^3 \cdot 50}{12} \right) + (518,35^2 \cdot 30 \cdot 50) \right] = [1936901784] + \\ & + [1552222093] + [1335146445] + [403150108,2] = 5227420430 [mm^4] \end{aligned}$$

Výpočet kvadratického momentu k ose Y

$$\begin{aligned} I_Y = & \left[\frac{B_1^3 \cdot t_1}{12} \right] + \left[\frac{B_1^3 \cdot t_2}{12} \right] + 2 \cdot \left[\left(\frac{t_3^3 \cdot H_1}{12} \right) + (d_1^2 \cdot t_3 \cdot H_1) \right] + \left[\frac{B_2^3 \cdot t_4}{12} \right] = \left[\frac{450^3 \cdot 16}{12} \right] + \left[\frac{450^3 \cdot 14}{12} \right] + \\ & + 2 \cdot \left[\left(\frac{8^3 \cdot 1000}{12} \right) + (186^2 \cdot 8 \cdot 1000) \right] + \left[\frac{50^3 \cdot 30}{12} \right] = [121500000] + [106312500] + [553621333,3] + \\ & + [312500] = 781746333,3 [mm^4] \end{aligned}$$

7. Posouzení na II. mezní stav

Dle normy ČSN 27 0103 je u jeřábů se dvěma hlavními nosníky nebo jedním hlavním nosníkem, u kterých kočka jezdí po horních pásnicích dána hodnota maximálního průhybu podílem $1/700$. [1]

- Dovolенý průhyb $y_D [mm]$
- Skutečný průhyb $y_{skut} [mm]$

$$y_D = \frac{1}{700} \cdot L = \frac{1}{700} \cdot 18880 = 26,97 [mm]$$

$$y_{skut} = \frac{(F_v + F_v) \cdot (L - b) \cdot [3 \cdot L^2 \cdot (L - b)^2]}{96 \cdot E \cdot I_x} = \frac{2 \cdot 101,7 \cdot (18880 - 1000) \cdot [3 \cdot 18880^2 \cdot (18880 - 1000)^2]}{96 \cdot 210000 \cdot 5227420430}$$

$$y_{skut} = 25,87 [mm] \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

8. Útlum konstrukce

Konstrukce musí splňovat podmínky útlumu při rozkmitání. U jeřábů s nosníky válcovanými, plnostěnnými nebo skříňovými se doporučuje, aby amplituda rozkmitaného mostu klesla během 15 sekund na maximálně 0,5[mm]. [1]

- Doba útlumu $t_u [s]$
- Vlastní frekvence kmitu nosníku $f [s^{-1}]$

$$t_u = \frac{Ln2y_{skut}}{f \cdot \nu} = \frac{\ln(2 \cdot 25,87)}{7,86 \cdot 0,07} = 7,17[s] \Rightarrow \text{vyhovuje, doba útlumu je menší jak } 15[s]$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{c_o}{m_{red}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{7829643}{3210}} = 7,86[s^{-1}]$$

Logaritmický dekrement útlumu kmitání

$\nu \Rightarrow$ určíme dle poměru ze strany 67. $\Rightarrow 0,07$ pro skříňové nosníky výšky 1/18 až 1/20 rozpětí

Tuhost nosníku

- Modul pružnosti v tahu $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ [MPa]}$

$$c_o = \frac{48 \cdot E \cdot I_x}{L^3} \cdot 10^3 = \frac{48 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 5227420430}{18880^3} \cdot 10^3 = 7829643,59 N \cdot mm^{-1} \approx 7829,6 [N \cdot m^{-1}]$$

Redukovaná hmotnost nosníku

$$m_{red} = \frac{q \cdot L}{2} + \frac{m_k + m_s}{i} = \frac{4500}{2} + \frac{1570 + 350}{2} = 3210 [kg]$$

9. Posouzení na I. mezní stav

Výpočet momentu setrvačnosti roznášecích prvků (kolejnice a horní pásnice k vlastním těžištním osám).

$\alpha \Rightarrow$ pro svařované konstrukce a válcované nosníky 3,25[-], určeno z normy ČSN 73 1401, str. 15.

$$J = \left(\frac{t_2 \cdot B_1}{12} \right) + \left(\frac{t_4 \cdot B_2}{12} \right)$$
$$J = \left(\frac{14^3 \cdot 450}{12} \right) + \left(\frac{30^3 \cdot 50}{12} \right) = (102900) + (112500) = 215400 [mm^4]$$

Místní napětí

$$\sigma_m = \frac{F_v}{l \cdot t_3} \leq R$$

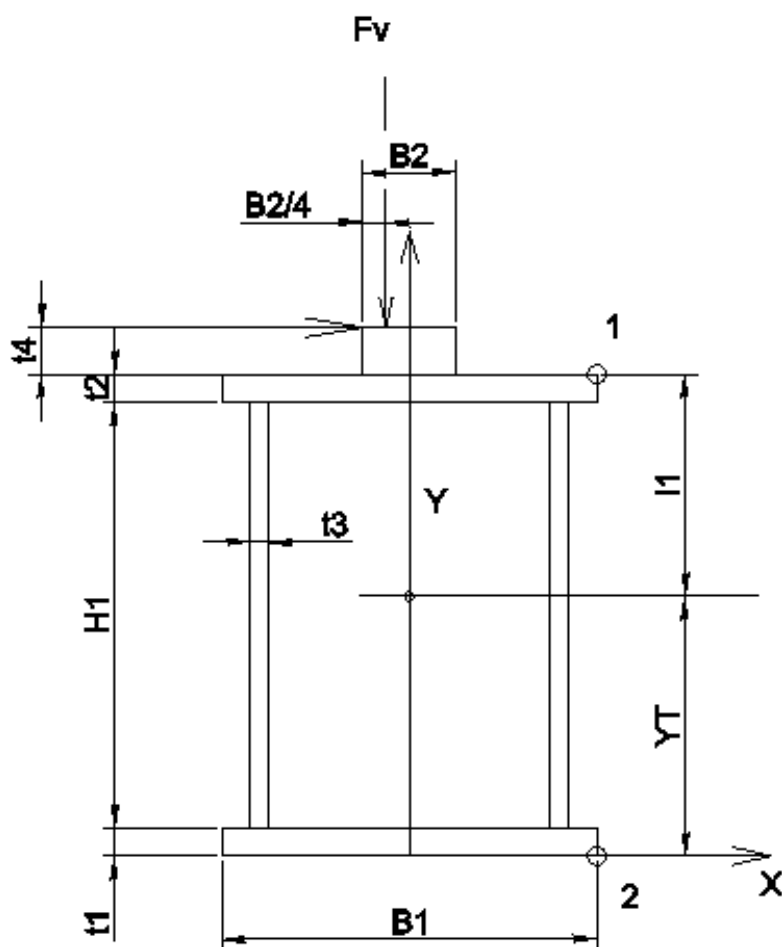
$$l = \alpha \cdot \sqrt[3]{\frac{J}{t_3}} = 3,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{215400}{8}} = 77,31 [-]$$

$$\sigma_m = \frac{82,3 \cdot 10^3}{77,31 \cdot 8 \cdot 2} \leq 290 [MPa]$$

$$\sigma_m = 66,53 \leq 290 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Výpočet napětí v určených bodech 1, 2. Kontrola průřezu v místě maximálního ohybového momentu

- Vzdálenost od centrálního těžiště k počítanému místu 1 $l_1 = 503,35 [mm]$
- Poloha centrálního těžiště a vzdálenost k místu 2 $Y_t = 526,65 [mm]$



Obrázek 15 Kontrola napětí v bodě 1 a 2

Výpočet průřezových modulů v ohybu k ose x v bodech 1, 2

$$W_{ox1} = \frac{I_X}{l_1} = \frac{5227420430}{503,35} = 10385359,62 [mm^3]$$

$$W_{ox2} = \frac{I_X}{Y_T} = \frac{5227420430}{526,65} = 9925795,94 [mm^3]$$

Výpočet průřezových modulů v ohybu k ose y

$$W_{oy} = \frac{I_Y}{\frac{B_1}{2}} = \frac{781746333,3}{\frac{450}{2}} = 3474428,15 [mm^3]$$

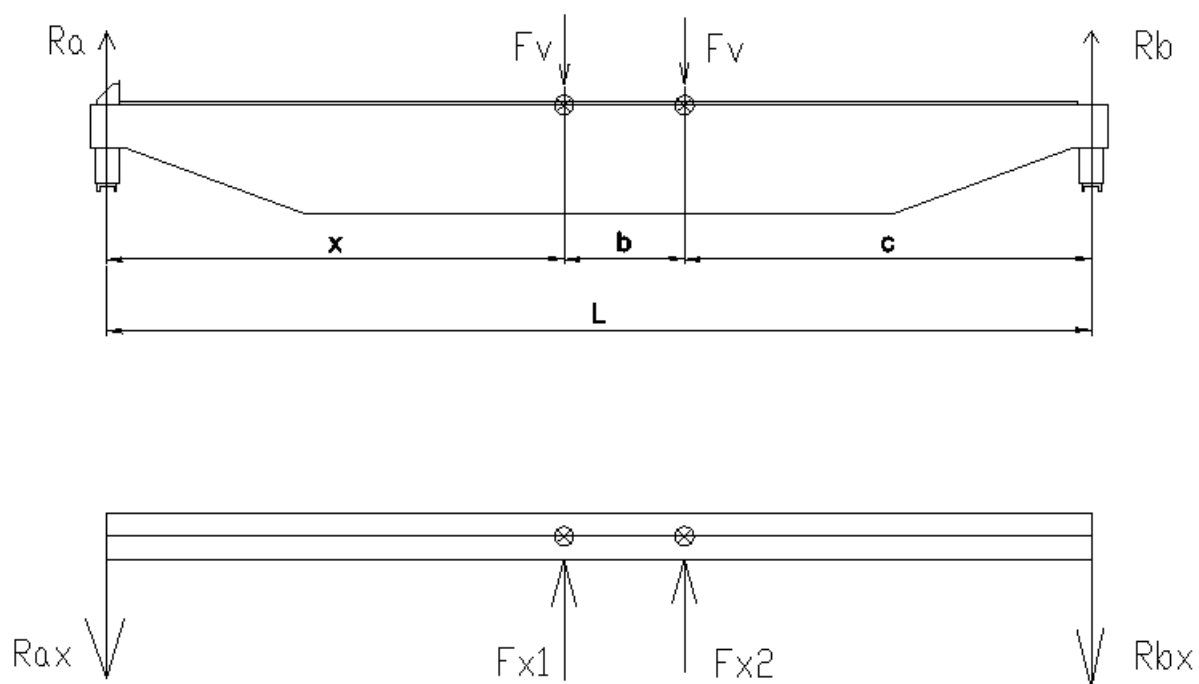
Výpočet krouticího momentu

$$M_k = l_1 \cdot [2 \cdot (0,1 \cdot F_v)] + \frac{1}{4} B_2 \cdot (2 \cdot F_v)$$

$$M_k = 0,54 \cdot [2 \cdot (0,1 \cdot 82,3)] + \frac{1}{4} \cdot 0,05 \cdot (2 \cdot 82,3)$$

$$M_k = 11 [\text{KN} \cdot \text{m}]$$

Výpočet vodorovného ohybového momentu $M_{ox \max}$



Obrázek 16 Schéma zatížení od vodorovných sil

- Vodorovná síla $F_{x1}=F_{x2} [\text{KN}]$
- Reakce od vodorovné síly $R_{ax}, R_{bx} [\text{KN}]$

$$F_{x1} = F_{x2} = 0,1 \cdot F_v = 0,1 \cdot 82,3 = 8,23 [KN]$$

$$\Sigma M_{BX} = 0$$

$$F_{x1} \cdot x + F_{x2} \cdot (x + b) - R_{BX} \cdot L = 0$$

$$R_{BX} = \frac{F_{x1} \cdot x + F_{x2} \cdot (x + b)}{L}$$

$$R_{BX} = \frac{F_{x1;2} \cdot (2 \cdot x + b)}{L} = \frac{8,23 \cdot (2 \cdot 9,09 + 1,4)}{18,88} = 8,54 [KN]$$

$$\Sigma M_{AX} = 0$$

$$R_{AX} \cdot L - F_{x1} \cdot (c + b) - F_{x2} \cdot c = 0$$

$$R_{AX} = \frac{F_{x1} \cdot (c + b) + F_{x2} \cdot c}{L} = \frac{F_{x1;2} \cdot (2 \cdot c + b)}{L} = \frac{8,23 \cdot (2 \cdot 8,39 + 1,4)}{18,88} = 7,92 [KN]$$

$$M_{ox \max} = R_{AX} \cdot x = 7,92 \cdot 9,09 = 72 [KN \cdot m]$$

Výpočet průřezového modulu v krutu

$$W_k = 2 \cdot (2 \cdot d_1) \cdot (a + a_2) = 2 \cdot (2 \cdot 186) \cdot (518,65 + 496,35) = 2 \cdot 372 \cdot 1015 = 755160 [mm^3]$$

Výpočet statického momentu k ose X, kde y_T je vzdálenost jednotlivých těžišť ploch od celkového těžiště.

$$S_{Xstat} = S_1 \cdot y_{T1} + S_2 \cdot y_{T2} + S_{3,4} \cdot y_{T3,4} + S_5 \cdot y_{T5}$$

$$S_{Xstat} = (450 \cdot 16 \cdot 518,65) + (450 \cdot 14 \cdot 496,35) + (1000 \cdot 8 \cdot 10,65) + (30 \cdot 50 \cdot 528,35)$$

$$S_{Xstat} = 7824210 [mm^3]$$

Napětí v bodech 1, 2 (u σ_y dosazují W_{ox} protože zatěžující síla je kolmá na osu x).

- Normálové napětí v bodě 1 $\sigma_{y1} [MPa]$
- Normálové napětí v bodě 2 $\sigma_{y2} [MPa]$
- Smykové napětí od krutu $\tau_k [MPa]$
- Smykové napětí při ohybu $\tau [MPa]$
- Kombinace napětí $\sigma_1; \sigma_2 [MPa]$

$$\sigma_{y1} = \frac{M_{ob\max}}{W_{ox1}} = \frac{720,4 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{10385359,62} = 69,4 [MPa]$$

$$\sigma_{y2} = \frac{M_{ob\max}}{W_{ox2}} = \frac{720,4 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{9925795,94} = 72,6 [MPa]$$

$$\sigma_x = \frac{M_{ox\max}}{W_{oy}} = \frac{72 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{3744428,15} = 19,3 [MPa]$$

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{11 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{755160} = 14,6 [MPa]$$

$$\Sigma \tau = \tau + \tau_k = 19,6 + 14,6 = 34,2 [MPa]$$

$$\Sigma \sigma_1 = 69,4 + 19,3 = 88,7 [MPa]$$

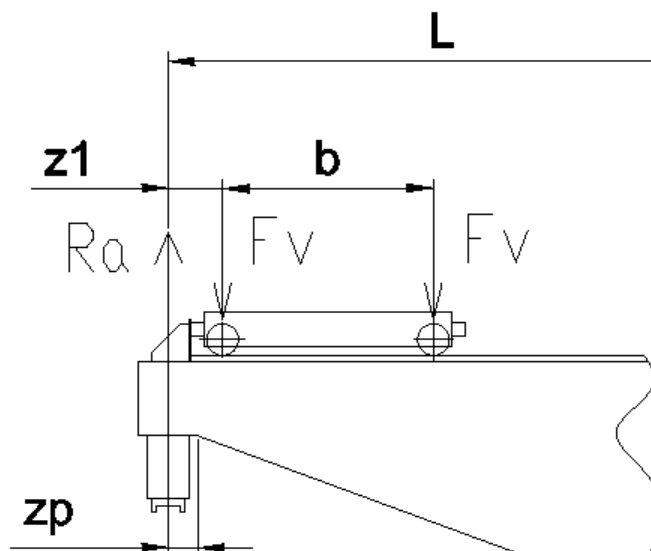
$$\Sigma \sigma_2 = 72,6 + 19,3 + 66,53 = 158,43 [MPa] \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\tau = \frac{T \cdot S}{I \cdot b} = \frac{209,31 \cdot 10^3 \cdot 7824210}{5227420430 \cdot 2 \cdot 8} = 19,6 [MPa] < 0,3 \cdot R = 0,3 \cdot 290 = 87 [MPa] \Rightarrow \text{není nutné}$$

kontrolovat podle HMM.

10. Kontrola v místě nejmenšího průřezu

Nejmenší průřez na nosníku se nachází v místě spojení konstrukce s pojezdem jeřábu. Kontrolujeme napětí v místě zvoleného bodu 3 a 4. Kontrolovaný průřez je ve vzdálenosti z_p [m] od reakce R_a .



Obrázek 17 Najetí kočky do krajní polohy

- Vzdálenost ke kontrolovanému průřezu $z_p = 0,14$ [m]

$$\Sigma M_b = 0$$

$$F_v \cdot (L - z_1 - b) + F_v \cdot (L - z_1) - R_a \cdot L = 0$$

$$R_a = \frac{F_v \cdot (L - z_1 - b) + F_v \cdot (L - z_1)}{L}$$

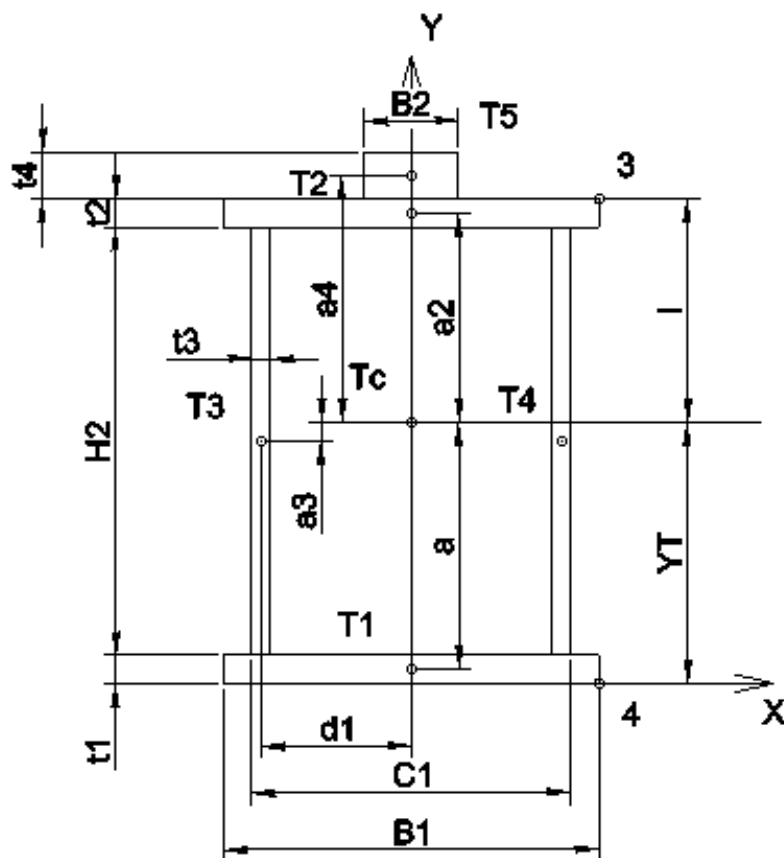
$$R_a = \frac{82,3 \cdot (18,88 - 0,148 - 1,4) + 82,3 \cdot (18,88 - 0,148)}{18,88} = \frac{82,3 \cdot 17,332 + 82,3 \cdot 18,732}{18,88} = \frac{82,3 \cdot (17332 + 18732)}{18,88}$$

$$R_a = 157,2 [KN]$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_a + R_b - 2 \cdot F_v \Rightarrow R_b = 2 \cdot F_v - R_a = 2 \cdot 82,3 - 157,2 = 7,4 [KN]$$

$$M_{o \max} = R_a \cdot z_p = 157,2 \cdot 0,14 = 22 [KN \cdot m]$$



Obrázek 18 Průřez nosníku v místě nad pojezdem

- Výška stojiny v zúženém místě $H_2 = 350$ [mm]
- Vzdálenost k místu 3 $l = 182,5$ [mm]

Výpočet celkového těžiště

n	S	x	y	Sx	Sy
1	7200	0	8	0	57600
2	6300	0	373	0	2349900
3	2800	-	191	-	534800
4	2800	+	191	+	534800
5	1500	0	395	0	592500
Σ	20600	-	-	0	4069600

$$Y_t = \frac{S_y}{\Sigma S} = \frac{4069600}{20600} = 197,5[mm]$$

$$X_t = \frac{S_x}{\Sigma S} = 0[mm]$$

Výpočet kvadratického momentu k ose X

$$\begin{aligned} I_X = & \left[\left(\frac{t_1^3 \cdot B_1}{12} \right) + (a^2 \cdot t_1 \cdot B_1) \right] + \left[\left(\frac{t_2^3 \cdot B_1}{12} \right) + (a_2^2 \cdot t_2 \cdot B_1) \right] + 2 \cdot \left[\left(\frac{H_2^3 \cdot t_3}{12} \right) + (a_3^2 \cdot H_2 \cdot t_3) \right] + \\ & + \left[\left(\frac{t_4^3 \cdot B_2}{12} \right) + (a_4^2 \cdot t_4 \cdot B_2) \right] = \left[\left(\frac{16^3 \cdot 450}{12} \right) + (189,5^2 \cdot 16 \cdot 450) \right] + \left[\left(\frac{14^3 \cdot 450}{12} \right) + (175,5^2 \cdot 14 \cdot 450) \right] + \\ & + 2 \cdot \left[\left(\frac{350^3 \cdot 8}{12} \right) + (6,5^2 \cdot 350 \cdot 8) \right] + \left[\left(\frac{30^3 \cdot 50}{12} \right) + (197,5^2 \cdot 30 \cdot 50) \right] = [258707400] + \\ & + [194144475] + [57403266,67] + [58621875] = 568877016,7[mm^4] \end{aligned}$$

Výpočet kvadratického momentu k ose Y

$$\begin{aligned} I_Y = & \left[\frac{B_1^3 \cdot t_1}{12} \right] + \left[\frac{B_1^3 \cdot t_2}{12} \right] + 2 \cdot \left[\left(\frac{t_3^3 \cdot H_2}{12} \right) + (d_1^2 \cdot t_3 \cdot H_2) \right] + \left[\frac{B_2^3 \cdot t_4}{12} \right] = \left[\frac{450^3 \cdot 16}{12} \right] + \left[\frac{450^3 \cdot 14}{12} \right] + \\ & + 2 \cdot \left[\left(\frac{8^3 \cdot 350}{12} \right) + (186^2 \cdot 8 \cdot 350) \right] + \left[\frac{50^3 \cdot 30}{12} \right] = [121500000] + [106312500] + [193767466,7] + \\ & + [312500] = 421892466,7[mm^4] \end{aligned}$$

Výpočet průřezových modulů v ohybu k osám X v bodech 3, 4

$$W_{ox3} = \frac{I_x}{l} = \frac{568877016,7}{182,5} = 3117134,4[mm^4]$$

$$W_{ox4} = \frac{I_x}{Y_t} = \frac{568877016,7}{197,5} = 2880389,96[mm^4]$$

Výpočet napětí v místech 3, 4

$$\sigma_3 = \frac{M_{o \max}}{W_{ox3}} = \frac{22 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{3117134,4} = 7,1 [MPa]$$

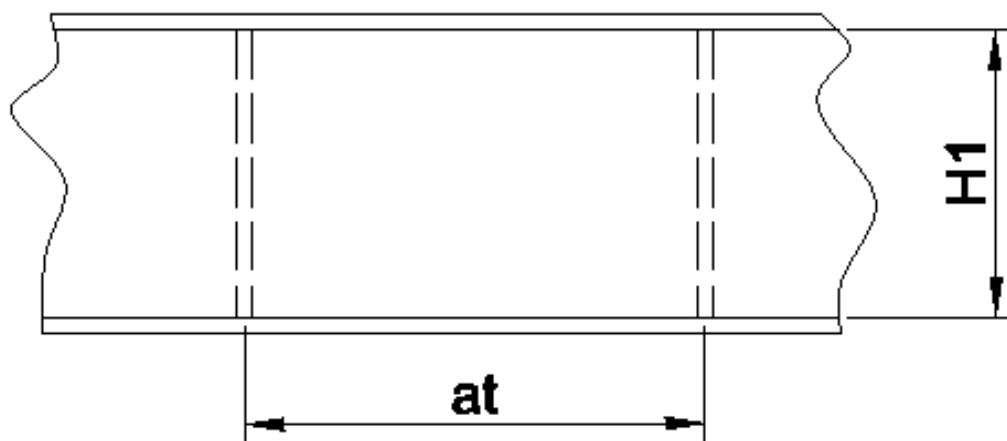
$$\sigma_4 = \frac{M_{o \max}}{W_{ox4}} = \frac{22 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{2880389,96} = 7,64 [MPa]$$

$$\tau_3 = \frac{T \cdot S_{stat}}{I_x \cdot b} = \frac{157,2 \cdot 10^3 \cdot (50 \cdot 30 \cdot 197,5)}{568877016,7 \cdot 50} = 1,6 [MPa]$$

$$\sigma_{3red} = \sqrt{\sigma_3^2 + 3 \cdot \tau_3^2} = \sqrt{7,1^2 + 2 \cdot 1,6^2} = 7,45 [MPa]$$

11. Boulení stěn

Boulení stěny se posuzuje mezi příčnými výztuhami, kde a_t [mm] je rozteč příčných výztuh.



Obrázek 19 Pole stěny mezi příčnými výztuhami

Vyztužení stěn nosníků

V místě působení osamělých břemen mají být navrženy příčné výztuhy stěny. Stěna nosníku se doporučuje vyztužit příčnými výztuhami při poměru výšky k tloušťce stěny. [2]

$$\frac{H_1}{t_3} > 80 \cdot \sqrt{\frac{2100}{R}}$$

$$\frac{1000}{8} > 80 \cdot \sqrt{\frac{2100}{2900}}$$

$125 > 68 \Rightarrow$ je nutné nosník vyztužit příčnými výztuhami

Vzdálenost příčných výztuh stěny má být:

$$a_t \leq 2 \cdot H_1 \text{ při } \frac{H_1}{t_3} > 100 \Rightarrow a_t \text{ volím } 1910 \text{ [mm]}$$

$$1910[\text{mm}] \leq 2000[\text{mm}] \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

$\chi = 0,8[-] \Rightarrow \check{\text{ČSN}} 73\ 1401, \text{ str. } 47, \text{ Tab. } 25$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{m,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{er}}\right)^2} \leq 1,0$$

$$\sqrt{\left(\frac{2465,3}{16128} + \frac{1305}{4238,48}\right)^2 + \left(\frac{411,5}{1,408 \cdot 10^{10}}\right)^2} \leq 1,0$$

$0,461 \leq 1,0 \Rightarrow \text{podmínka splněna}$

a)

$$\sigma_{cr} = K_o \cdot \left(\frac{100 \cdot t_3}{H_1}\right)^2 = 6300 \cdot \left(\frac{100 \cdot 2 \cdot 8}{1000}\right)^2 = 16128$$

$$\gamma = \chi \cdot \frac{B_1}{H_1} \cdot \left(\frac{t_2}{t_3}\right)^3 = 0,8 \cdot \frac{450}{1000} \cdot \left(\frac{14}{2 \cdot 8}\right)^3 = 0,24[-] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow K_o = 6300[-]$$

b)

$$\tau_{cr} = \left(1250 + \frac{950}{\alpha^2}\right) \cdot \left(\frac{100 \cdot t_3}{s}\right)^2 = \left(1250 + \frac{950}{1,91^2}\right) \cdot \left(\frac{100 \cdot 2 \cdot 8}{0,524}\right)^2 = 1,408 \cdot 10^{10}$$

$$\alpha = \frac{a}{H_1} = \frac{1910}{1000} = 1,91[-]$$

$$s = \frac{H_1}{a} = \frac{1000}{1910} = 0,524[-]$$

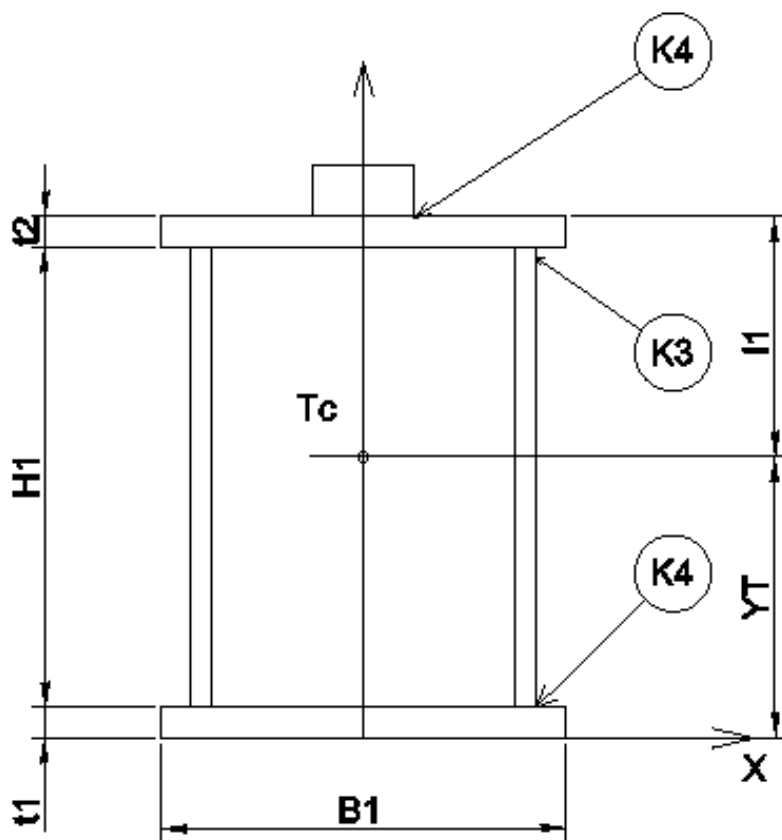
c)

$$\sigma_{m,cr} = k_1 \cdot \left(\frac{100 \cdot t_3}{a}\right)^2 = 6040 \cdot \left(\frac{100 \cdot 2 \cdot 8}{1910}\right)^2 = 4238,48$$

$$k_1 = 6040[-] \Rightarrow \text{učen ze strany } 48, \text{ Tab. } 29$$

12. Únosnost při únavě

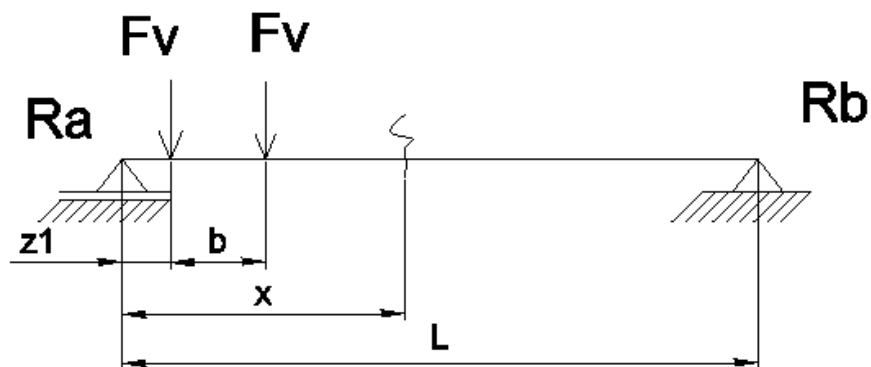
Při kontrole nosníku na únavu se bere v potaz provozní skupina jeřábu a vrubové skupiny jednotlivých konstrukčních uzlů. Při velkém počtu cyklů se mohou tyto konstrukční uzly (svary a jednotlivé prvky) vlivem zatížení porušit. Kontrolovaný průřez je v místě maximálního ohybového momentu. Výpočtová pevnost materiálu při únavě $R_{fat(-1)}$ se určí dle provozní skupiny jeřábu a vrubových skupin a z řad ocelí. σ_{min} se vypočítá se spočítá při najetí kočky do krajní polohy.



Obrázek 20 Kontrola průřezu na únavu v místě největšího ohybového momentu

12.1 Horní pásnice

Pásnice je namáhaná pulsujícím tlakem. Vypočítáme a srovnáme normálové napětí v horní pásnici s výpočtovou pevností při únavě $R_{fat,p(\chi_u)}$ v tlaku. Výpočtové pevnosti materiálu jsou určeny dle provozní skupiny a vrubové skupiny ze str. 27, Tab. 14. Provozní skupina J3, vrubovou skupinu K4.



Obrázek 21 Výpočet minimálního napětí v místě maximálního ohybového momentu

Dle provozní skupiny a vrubové skupiny ze strany 27, Tab. 14, řada oceli 52 \Rightarrow je **Základní výpočtová pevnost při únavě**.

$$R_{fat(-1)} = 76,4 [MPa]$$

Výpočtová pevnost materiálu v tlaku

$$R_{fat,p(o)} = 2 \cdot R_{fat(-1)}$$

$$R_{fat,p(o)} = 2 \cdot 76,4$$

$$R_{fat,p(o)} = 152,8 [MPa]$$

Výpočet σ_{\min} v místě x

$$\Sigma M_b = 0$$

$$-R_a \cdot L + F_v \cdot (L - a_6) + F_v \cdot (L - a_6 - b) = 0$$

$$R_a = \frac{F_v \cdot (L - a_6) + F_v \cdot (L - a_6 - b)}{L} = \frac{82,3 \cdot (18,88 - 0,148) + 82,3 \cdot (18,88 - 0,148 - 1,4)}{18,88}$$

$$R_a = \frac{82,3 \cdot 18,732 + 82,3 \cdot 17,332}{18,88} = 157,2 [KN]$$

$$\Sigma F_y = R_a + R_b - 2 \cdot F_v \Rightarrow R_b = 2 \cdot F_v - R_a = 2 \cdot 82,3 - 157,2 = 7,4 [KN]$$

$$M_{ox} = R_a \cdot x - F_v \cdot (x - a_6) - F_v \cdot (x - a_6 - b)$$

$$M_{ox} = 157,2 \cdot 9,09 - 82,3 \cdot (9,09 - 0,148) - 82,3 \cdot (9,09 - 0,148 - 1,4)$$

$$M_{ox} = 72,3 [KN \cdot m]$$

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{ox}}{I_x} \cdot l_1 = \frac{72,3 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{5227420430} \cdot 503,35 = 6,96 [MPa]$$

Výpočet poměru mezních napětí

$$\chi_u = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{6,96}{69,4} = 0,1 [-]$$

Výpočtová pevnost při únavě

$$R_{fat,p(\chi)} = \frac{R_{fat,p(o)}}{1 - \left(1 - \frac{R_{fat,p(o)}}{0,9 \cdot Rm}\right) \cdot \chi_u} = \frac{152,8}{1 - \left(1 - \frac{152,8}{0,9 \cdot 520}\right) \cdot 0,1} = 163,83 [MPa]$$

$$R_{fat,p(\chi)} > \sigma_{\max}$$

$$163,83 [MPa] > 69,4 [MPa] \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

12.2 Spodní pásnice

Spodní pásnice je namáhána míjivým tahem. Srovnáme vypočítané normálové napětí s výpočtovou pevností při únavě v tahu $R_{fat,t(\chi_u)}$. Výpočtové pevnosti jsou určeny ze str. 27, Tab. 14. Provozní skupina J3, vrubová skupina K4.

Základní výpočtová pevnost

$$R_{fat(-1)} = 76,4[MPa] \Rightarrow \text{dle provozní skupiny a vrubové skupiny J3, K4}$$

Výpočtová pevnost materiálu v tahu

$$R_{fat,t(0)} = \frac{5}{3} \cdot R_{fat(-1)}$$

$$R_{fat,t(0)} = \frac{5}{3} \cdot 76,4 = 127,33[MPa]$$

Výpočet $\sigma_{\min} \Rightarrow$ v místě x

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{ox}}{I_x} \cdot Y_t = \frac{72,3 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{5227420430} \cdot 526,65 = 7,3[MPa]$$

Výpočet $\sigma_{\max} \Rightarrow$ v místě x

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{o \max}}{I_x} \cdot Y_t = \frac{720,4 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{5227420430} \cdot 526,65 = 72,6[MPa]$$

Výpočet poměru mezních stavů

$$\chi_u = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{7,3}{72,6} = 0,1[-]$$

Výpočtová pevnost při únavě

$$R_{fat,t(\chi)} = \frac{R_{fat,t(o)}}{1 - \left(1 - \frac{R_{fat,t(o)}}{0,75 \cdot R_m}\right) \cdot \chi_u} = \frac{127,33}{1 - \left(1 - \frac{127,33}{0,75 \cdot 520}\right) \cdot 0,1} = 136,53[MPa]$$

$$R_{fat,t(\chi)} > \sigma_{\max}$$

$$136,53 > 72,6 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

12.3 Stojina pod horní pásnicí

Jedná se o namáhání tlakem, provozní skupina J3, vrubová skupina K3.

Základní výpočtová pevnost

$$R_{fat,p(-1)} = 127,3[MPa]$$

Výpočtová pevnost materiálu v tlaku

$$R_{fat,p(0)} = 2 \cdot R_{fat(-1)} = 2 \cdot 127,3 = 254,6[MPa]$$

Výpočet σ_{\min} v místě x

e = vzdálenost od centrálního těžiště po spodní hranu horní pásnice

$$e = 489,35[mm]$$

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{ox}}{I_x} \cdot e = \frac{72,3 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{5227420430} \cdot 489,35 = 6,77[MPa]$$

Výpočet σ_{\max} v místě x

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{omax}}{I_x} \cdot e = \frac{720,4 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{5227420430} \cdot 489,35 = 67,44[MPa]$$

Výpočet poměru mezních stavů

$$\chi_u \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{6,77}{67,44} = 0,1[-]$$

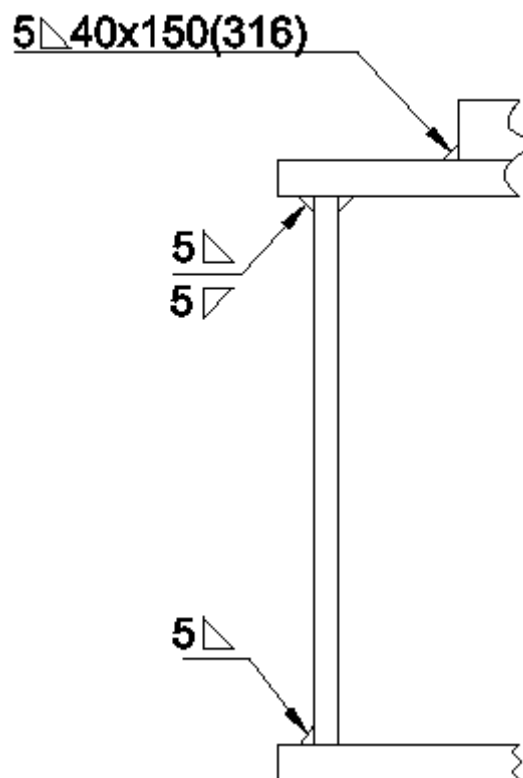
Výpočtová pevnost při únavě

$$R_{fat,p(\chi)} = \frac{R_{fat,p(o)}}{1 - \left(1 - \frac{R_{fat,p(o)}}{0,9 \cdot R_m}\right) \cdot \chi_u} = \frac{254,6}{1 - \left(1 - \frac{254,6}{0,9 \cdot 520}\right) \cdot 0,1} = 266,76 [MPa]$$

$$R_{fat,p(\chi)} > \sigma_{\max}$$

$$266,76 > 67,44 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

13. Kontrola svaru v místě maximálního ohybového momentu



Obrázek 22 Kontrola svaru

13.1 Horní pásnice

Kolejnice je přivařena k pásnici přerušovanými koutovými svary o velikosti rozměru $a = 5$ [mm]. Délka svaru je 150 [mm]. Stojina a horní pásnice jsou k sobě přivařeny dvojstranným $\frac{1}{2}V$ svarem doplněnými koutovými svary normální jakosti. Jedná se o namáhání tlakem, provozní skupina J3, vrubová skupina K3. Smykové rovnoběžné napětí je vypočítáno z maximální posouvající síly, statického momentu horní pásnice, kvadratického momentu celého průřezu a průřezu svaru. Smykové napětí kolmé je vypočítáno od kolového tlaku zatížené kočky a ze součtu momentu setrvačnosti roznášecích prvků a tloušťky svaru. $\sigma_{//}$ je vypočítáno z maximálního ohybového momentu a momentu setrvačnosti celého průřezu vynásobenou vzdáleností l_1 . Výsledné napětí se srovná s výpočtovým namáháním v tlaku.

$$\text{Velikost svaru } a = 5 \Rightarrow t = \frac{a}{0,7} = 7,14 [\text{mm}]$$

$$S_{sta} = B_1 \cdot t_2 \cdot \left(t_1 + H_1 + \frac{t_2}{2} - Y_t \right) = 450 \cdot 14 \cdot \left(16 + 1000 + \frac{14}{2} - 526,65 \right) = 3127005 [mm^3]$$

$$\tau_{//} = \frac{R_a \cdot S_{sta}}{I_x \cdot 4 \cdot a} = \frac{209,31 \cdot 10^3 \cdot 3127005}{5227420430 \cdot 4 \cdot 5} = 6,2 [MPa]$$

$$\tau_{\perp} = \frac{F_v}{l \cdot d} = \frac{82,3 \cdot 10^3}{65,8 \cdot (2 \cdot 8)} = 78,2 [MPa]$$

$$l = \alpha \cdot \sqrt[3]{\frac{J}{1,4 \cdot t + d}} = 3,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{215400}{1,4 \cdot 7,14 + (2 \cdot 8)}} = 65,8 [-]$$

$$\sqrt{\sigma_{//}^2 + \left(\frac{\tau_{\perp}}{0,75} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{//}}{0,65} \right)^2} = \alpha \cdot R$$

pro $t < 10 [mm]$ – (t se dosazuje v [cm])

$$\alpha = 1,3 - 0,3 \cdot t$$

$$\alpha = 1,3 - 0,3 \cdot 0,7$$

$$\alpha = 1,09$$

$$\sqrt{69,4^2 + \left(\frac{78,2}{0,75} \right)^2 + \left(\frac{6,2}{0,65} \right)^2} \leq 1,09 \cdot 290$$

$$125,6 \leq 316,1 [MPa]$$

13.2 Spodní pásnice

Pásnice je přivařena jednostranným koutovým svarem ke stojinám. Velikost svaru $a = 5 [mm]$. Smykové rovnoběžné napětí je spočítané z maximální posouvající síly a ze statického momentu spodní pásnice z kvadratického momentu celého průřezu a velikosti svaru. Normálně napětí $\sigma_{//}$ je vypočítáno ze σ_{y2} . Vypočítané napětí srovnáme s výpočtovým namáháním v tahu.

$$S_{stat} = B_1 \cdot t_1 \cdot \left(Y_t - \frac{t_1}{2} \right) = 450 \cdot 16 \cdot \left(526,65 - \frac{16}{2} \right) = 3734280 [mm^3]$$

$$\tau_{//} = \frac{R_a \cdot S_{stat}}{I_x \cdot 2 \cdot 5} = \frac{209,31 \cdot 10^3 \cdot 3734280}{5227420430 \cdot 2 \cdot 5} = 14,95 [MPa]$$

$$\sqrt{\sigma_{//}^2 + \left(\frac{\tau_{//}}{0,65} \right)^2} = \alpha \cdot R$$

$$\sqrt{72,6^2 + \left(\frac{14,95}{0,65} \right)^2} = 1,09 \cdot 290$$

$$75,87 \leq 316,1 [MPa]$$

14. Kontrola svaru v zúženém průřezu

14.1 Horní pásnice

Svary v zúženém průřezu jsou stejné velikosti a stejného typu jako v kapitole 13.1. Smykové napětí rovnoběžné se spočítá z maximální reakce R_a při poloze jeřábové kočky v krajní poloze. Normálové napětí je spočítáno z ohybového momentu který vzniká od působení kočky v krajní poloze.

$$S_{stat} = B_1 \cdot t_2 \cdot \left(t_1 + H_2 + \frac{t_2}{2} - Y_t \right) = 450 \cdot 14 \cdot \left(16 + 350 + \frac{14}{2} - 197,5 \right) = 1031940 [mm^3]$$

$$\tau_{//} = \frac{R_a \cdot S_{stat}}{I_x \cdot 4 \cdot a} = \frac{209,31 \cdot 10^3 \cdot 1031940}{568877016,7 \cdot 4 \cdot 5} = 18,98 [MPa]$$

$$\tau_{\perp} = \frac{R_a}{l \cdot d} = \frac{209,31 \cdot 10^3}{65,8 \cdot (2 \cdot 8)} = 198,81 [MPa]$$

$$l = \alpha \cdot \sqrt[3]{\frac{J}{1,4 \cdot t + d}} = 3,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{215400}{1,4 \cdot 7,1 + 2 \cdot 8}} = 65,8 [-]$$

$$\sigma_{//} = 7,1 [MPa]$$

$$\sqrt{\sigma_{//}^2 + \left(\frac{\tau_{\perp}}{0,75} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{//}}{0,65} \right)^2} = \alpha \cdot R$$

$$\sqrt{7,1^2 + \left(\frac{198,81}{0,75} \right)^2 + \left(\frac{18,98}{0,65} \right)^2} = 1,09 \cdot 290$$

$$266,78 \leq 316,1 [MPa]$$

14.2 Dolní pásnice

Provedení svarů je shodné jako v kapitole 13.2. Smykové napětí vypočítáno z maximální posouvající síly a statického momentu spodní pásnice, kvadratického momentu celého zúženého průřezu a velikosti svaru. Normálové napětí je vypočítáno z ohybového momentu působícího v zúženém průřezu na dolní pásnici.

$$S_{stat} = B_1 \cdot t_1 \cdot \left(Y_t - \frac{t_1}{2} \right) = 450 \cdot 16 \cdot \left(197,5 - \frac{16}{2} \right) = 136440 [mm^3]$$

$$\tau_{//} = \frac{R_a \cdot S_{stat}}{I_x \cdot 2 \cdot 5} = \frac{209,31 \cdot 10^3 \cdot 136440}{568877016,7 \cdot 2 \cdot 5} = 5,02 [MPa]$$

$$\sigma_{//} = \sigma_4 = 7,64 [MPa]$$

$$\sqrt{\sigma_{//}^2 + \left(\frac{\tau_{//}}{0,65} \right)^2} = \alpha \cdot R$$

$$\sqrt{7,64^2 + \left(\frac{5,02}{0,65} \right)^2} = 316,1$$

$$10,9 \leq 316,1 [MPa]$$

15. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout nosník dvounosníkového mostového jeřábu. V první části bakalářské práce jsem uvedl základní rozdělení jeřábů. V další kapitole jsou popsány hlavní části mostového jeřábu a rozdíl mezi příhradovou a skříňovou konstrukcí. Dle vstupních parametrů a normy ČSN 27 0103 jsem provedl začlenění jeřábu do tříd. Podle vstupních údajů a charakteristiky provozu byla vytypována jeřábová kočka a pojezdy pro jeřáb. Po vypočítání zatížení a jejich součinitelů následuje návrh nosného prvku. Nosník je navržen z materiálu 11 523 s mezí kluzu R_e 360 [MPa] a mezí pevnosti R_m 520 [MPa] a vrubovou houževnatostí při teplotě -20 [°C]. Po navržení základního tvaru je nosník posouzen podle normy ČSN 73 1401 na dva mezní stavy. V poslední kapitole jsem se zabýval kontrolou koutových svarových spojů, které spojují horní a dolní pásnici ke stojinám. Výstupem této práce je statický výpočet s výrobní dokumentací.

16. Použitá literatura

- [1] ČSN 27 0103: *Navrhování ocelových konstrukcí jeřábu*, výpočet podle mezních stavů, 1989.
- [2] ČSN 73 1401: *Navrhování ocelových konstrukcí*, ÚNM Praha, 1989
- [3] REMTA, F., KUPKA, L., DRAŽAN, F. : *Jeřáby 1. díl*, 2. Přepřacované a doplněné vydání, SNTL Praha, 1974.
- [4] ČSN 27 0142: *Jeřáby a zdvihadla*, 1989
- [5] DEMAG CRANES & COMPONENTS, spol. s.r.o. [online]. Dostupné z: <<http://demagcranes.cz>>.
- [6] LEINVEBER, J., VÁVRA, P. : *Strojnické tabulky*. Praha, Albra 2006, 3. Vydání
- [7] GIGA, spol. s.r.o [online]. Dostupné z: <<http://gigasro.cz>>.
- [8] KLIMEX [online]. Dostupné z: <<http://klimex.cz>>.
- [9] HUISMANEQUIPMENT [online]. Dostupné z: <http://huismanequipment.com>.

17. Seznam obrázků

Obrázek 1 Portálový jeřáb [7]	24
Obrázek 2 Silniční jeřáb [8]	25
Obrázek 3 Sloupový otočný jeřáb [7]	25
Obrázek 4 Pojízdný konzolový jeřáb [7].....	26
Obrázek 5 Plovoucí jeřáb [9]	26
Obrázek 6 Dvounosníkový mostový jeřáb [5]	27
Obrázek 7 Konstrukční uspořádání	30
Obrázek 8 Schéma zatížení	34
Obrázek 9 Zatížení jeřábového mostu silami od přičení.....	35
Obrázek 10 Průběh posouvajících sil a ohybového momentu od vlastní tíhy	37
Obrázek 11 Průběh posouvajících sil a ohybového momentu od jmenovitého břemene a kočky	38
Obrázek 12 Schéma podélné brzděné síly	39
Obrázek 13 Schéma zatížení od příčné síly	40
Obrázek 14 Návrh průřezu nosníku	41
Obrázek 15 Kontrola napětí v bodě 1 a 2.....	47
Obrázek 16 Schéma zatížení od vodorovných sil	48
Obrázek 17 Najetí kočky do krajní polohy	51
Obrázek 18 Průřez nosníku v místě nad pojezdem	52
Obrázek 19 Pole stěny mezi příčnými výztuhami.....	55
Obrázek 20 Kontrola průřezu na únavu v místě největšího ohybového momentu	57
Obrázek 21 Výpočet minimálního napětí v místě maximálního ohybového momentu	58
Obrázek 22 Kontrola svaru	63

18. Seznam příloh

Výkresová dokumentace